

基于分数阶Fourier变换的并行组合扩频Chirp水声通信系统研究

The Research in Parallel Combinatory Spread Spectrum Chirp Underwater Acoustic Communication Systems Based on Fractional Fourier Transform

厦门大学信息科学与技术学院 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 郑伟宇 许芳
WeiYu Zheng, Fang Xu

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education School of Information Science and Technology, Xiamen 361005, China)

【摘要】 Chirp信号具有较大的时宽带宽积,因此具有较强的抗多普勒扩展的能力,近年来在水下通信环境中得到广泛应用。但由于水声信道带宽非常有限,而Chirp信号又是一种宽带的信号,因此水下多载波Chirp系统中的通信速率一般较低。利用Chirp信号在分数阶Fourier变换(Fractional Fourier Transform, FrFT)的最佳分数阶变换域的冲激特性,结合并行组合扩频(Parallel Combinatory Spread Spectrum, PCSS)技术,本文提出了一个基于FrFT的并行组合扩频Chirp水声通信系统。该系统的特点是:一方面充分利用Chirp信号的性质,在保证可靠性的同时,省去均衡环节,大大简化通信系统接收端结构;另一方面,通过并行组合多载波的选择方式有效提升了系统的速率,提高了系统的频带利用率。通过在计算机仿真和实验室水池实验验证了该系统的性能。

【关键词】 水声通信; Chirp信号; 并行组合扩频; 分数阶Fourier变换

Abstract: Because of the large time-bandwidth product, Chirp signal has the ability to resist the Doppler effect and is widely employed in underwater acoustic communication systems. Since the underwater acoustic channel is very bandwidth limited while the bandwidth of the Chirp signal has to be certain extent to keep the characteristics of the Chirp signal, the data rate of the underwater multicarrier chirp communication system is very low. Taking advantage of the impulse characteristics of the Chirp signal in the best fractional Fourier transform domain, as well as the Parallel Combinatory Spread Spectrum(PCSS)algorithm, a PCSS Chirp underwater acoustic communication system based on FrFT is proposed in this paper. On the one hand, this system makes full use of the characteristics of the Chirp signals, and simplifies the receiver of the system by removing the equalization module. On the other hand, data rate of the communication system could be increased by applying PCSS algorithm. The BER performance and data rate are verified by computer simulations and experiments of the pool.

Key words: underwater acoustic communication; Chirp; Parallel Combinatory Spread Spectrum; Fractional Fourier transform(FrFT)

对于海洋的探索是人类永恒的话题,声通信是最适合海洋环境的通信方式之一,随着海洋资源的开发和利用的深入,海洋相关信息参数的传输以及人们在海洋环境中的交互通信的需求日增,人们对水声通信的距离、数据传输速率以及功耗都提出了更高的要求。浅海水声信道是一个复杂的信道,伴随有时间和空间上的不确定性,而且具有严重多径干扰、多普勒频移、频率选择性衰落及有限的传输带宽等特征^[1-3]。Chirp是一种常见的非平稳宽带信号,无论是在雷达、地震亦或是语音、医电等领域都有广泛的应用。由于其宽带特性,Chirp可作为一种扩频信号使用,其本身具有一定的抗多径干扰的能力,并且由于具有较大的时宽带宽积,因此在移动环境中具有一定的抗多普勒效应的能力;分数阶Fourier变换(FrFT)可以理解为是一种广义的Fourier变换。Chirp信号在FrFT域中有类似于正弦信号在Fourier变换域中的性能,呈现能量聚集性。基于此特性,文献^[4]使用了分割频带进行二进制键控控制的方法,在FrFT域进行判决,提出了FrFT_CSS系统。由于系统是单载波通信系统,系统的通信速率约为200bps(根据文献中给的参数估计)。本文利用Chirp信号在FrFT变换域的这种能量聚集特性进行编码来实现水声通信,将并行组合扩频技术和Chirp信号相结合,提出了一种适用于Chirp基底的编码组合通信,有效提升了水声通信系统的通信速率(达到500bps)。在接收端使用FrFT的方法实现多载波Chirp信号的检测。通过计算机仿真和实验室水池实验验证了该系统的可行性和稳健性。

1. 分数阶Fourier变换的原理

分数阶Fourier变换可以看成是广义的Fourier

变换,其本质上是一种时频分析手段,建立了时间域与分数阶域的联系。分数阶Fourier变换的表达式被定义为:

$$X_p(u) = \{F^p[x(t)]\}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) K_p(t, u) dt \quad (1)$$

式中的 $K_p(t, u)$ 是分数阶Fourier变换的核函数,定义为:

$$K_p(t, u) = A_p \exp[j\pi(u^2 \cot \alpha - 2ut \csc \alpha + t^2 \cot \alpha)] \quad (2)$$

其中, $A_p = \sqrt{1-j \cot \alpha}$, $\alpha = p\pi/2$ 是时频轴的旋转角度, p 是分数阶Fourier变换的阶数。从式(2)中可以看出分数阶Fourier变换的核函数 $K_p(t, u)$ 具有Chirp信号的形式。将(2)式代入(1)式,可以得到:

$$X_p(u) = \{F^p[x(t)]\}(u) = \begin{cases} \sqrt{1-j \cot \alpha} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[j\pi(u^2 + t^2) \cot \alpha - \frac{2ut}{\sin \alpha}] x(t) dt, \alpha \neq n\pi \\ x(t), \alpha = 2n\pi \\ x(-t), \alpha = (2n+1)\pi \end{cases} \quad (3)$$

由分数阶Fourier的旋转特性不难推出,其 p 阶变换的逆变换为 $-p$ 阶分数阶Fourier变换,即:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_p(u) K_{-p}(t, u) du \quad (4)$$

离散分数阶Fourier(Discrete Fractional Fourier Transform, DFrFT)变换有多种实现方式,主要分为线性加权型、特征分解型和采样型^[5]。本文中所使用的是Ozaktas提出的采样型算法^[5]。这种算法具有计算速度快,精度高的特点,可以利用FFT获得计算复杂度为 $O(N \log N)$ 的数值算法,是目前FrFT数值计算中应用最广泛的算法之一。需要注意的是这种算法的运算机理要求在进行计算之前先对原始信号进行量纲归一化处理^[5]。

2. 基于FrFT的并行组合扩频Chirp水声系统

并行组合扩频技术是由中国科技大学的

朱近康教授在1990年提出的一种新的软扩频通信方式^[6]。普通的扩频通信方式每个码元只能携带1bit信息,信息传输速率以及频带的带宽利用率相对较低,而通过组合编码的方式可以有效地提升系统的带宽利用率。并行组合扩频的基本原理是在 M 个正交扩频序列中,根据要传送的数据信息,选取其中的 r 个序列及其序列的相位信息,并行发送,能同时传送 $k = r + \log_2 C_M$ 比特信息。并行组合通信是一种高效的通信方式,这种通信方式的通信速率和频带利用率明显优于普通的扩频通信方式,适合于频带受限的通信环境。并行组合扩频方式,提出了一种通过组合的软扩频方式在发送载波个数不变的情况下提升了同时传输的信息数据量,为我们提供了一种通过组合提升速率的思想,在结合到Chirp扩频系统当中时,利用Chirp信号的宽带及其正负调频之间的特性,文中提出了一种对带宽进行组合,对正负调频用来表征相位的并行组合扩频Chirp通信方案。

2.1 二进制正交键控的多载波Chirp水声通信方案

对于一个 p 阶的分数阶Fourier变换,考察其上的一个冲击函数 $F^p[\delta(u-n)] = \delta(u-n)$,则有:

$$\begin{aligned} x_n(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \delta(u-n) K_{-p}(t, u) du \\ &= A_{-p} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(u-n) \exp[j\pi((u^2 + t^2) \cot(-\alpha) - \frac{2ut}{\sin(-\alpha)})] du \\ &= A_{-p} \exp[-j\pi((n^2 + t^2) \cot \alpha - \frac{2nt}{\sin \alpha})] \end{aligned} \quad (5)$$

可知,在 p 阶分数阶Fourier变换域上具有冲击函数特性信号的是一组以调频率:

$$k = -\cot \alpha = -\cot(\frac{p\pi}{2}) \text{ 的线性调频的复指数函数}$$

参考文献

- [1]王强.浅析工业炼铁自动化仪表系统调试[J].数字技术与应用,2013,04:40.
- [2]张胆庆.石化自动化仪表的设计和安装[J].化工管理,2013,16:181.
- [3]段林生.炼钢工业炉子本体自动化仪表的安装与调试[J].科技情报开发与经济,2009,31:289-290.
- [4]赵群,张翔,谢素珍,等.自动化仪表与控制系统的现状与发展趋势综述[J].现代制造技术与装备,2009,04:12-16.

四、结束语

综上所述,在自动化仪表安装与测定环

节中,均可能产生不同程度的故障,导致故障的原因即包括机器自身的因素,同样也可能是由于生产、制造工艺等因素引起,为保障生产、制造活动的顺利进行,需强化对仪表控制与检测过程的监控,正确判定系统产生故障的原因,并采取有效的调试策略,进而做到充分发挥自动化仪表的检测作用,提升生产、制造的效率。

数^[7]。对于两个中心频率相同,调频率互为相反数 k_1 和 k_2 ,持续时间相同(即两个Chirp信号覆盖的带宽相同)的两个Chirp信号,设他们为 Chirp_1 和 Chirp_2 ,则有:

$$-\cot(\frac{p_1\pi}{2})=k_1=-k_2=\cot(\frac{p_2\pi}{2})=-\cot(\frac{(2-p_2)\pi}{2}) \quad (6)$$

其中, p_1 和 p_2 分别为调频率为 k_1 和 k_2 的两个Chirp信号的FrFT最佳阶数。由(6)式可以得到 $p_2=2-p_1$, $p_1+p_2=2$,对于 Chirp_1 和 Chirp_2 ,它们满足中心频率相同,占用的带宽也相同,但是在FrFT域内能量聚集所对应的最佳阶数 p_1 和 p_2 却不同。利用这个特点,可以在 Chirp_1 和 Chirp_2 上调制不同的信息。在可用带宽范围内,选择中心频率不同,但调频率互为相反数且持续时间相同的一系列Chirp信号作为基底来并行调制信号。例如在本文中,首先将系统频带分割为带宽相同的数个区域(本系统为8个),在其上分别调制调频率绝对值相同的正负调频信号,则可得到8个调频率为 k_1 和8个调频率为 k_2 的带宽相同的Chirp信号。

2.2 并行组合的扩频Chirp通信系统

我们进一步使用并行组合的理论来进行多个Chirp信号的选择。以本系统为例,采用8选4的方案,则能同时传输 $\log_2 C_8^4 + 4 = 10$ 比特信息,而在没有组合的情况下,则仅能传输4比特信息,可见,在发送的并行chirp信号数量同等条件下,使用并行组合扩频Chirp通信系统的通信速率是多载波Chirp通信系统的2.5倍。并行组合多载波Chirp系统的框图如图1所示。在发送端,首先将信源信号进行串并变换,然后进行并行组合扩频选出4个Chirp信号,信号相加并加入帧同步信号后,经过放大后通过换能器送入水声信道中传输。接收端经过滤波放大后,首先进行同步信号获取。对同步后的信号进行最佳阶数为 p_1 和 p_2 的分数阶Fourier变换,根据先验的中心频率的知识,进行峰值判决,得到4个Chirp信号,再进行并行组合逆映射,解调数据信息。由于Chirp信号本身具有较强的抗多普勒频移的特性,且系统使用的检测方法FrFT是在时频域联合处理的,因此,为保证系统的简洁有效,本文提出的系统没有采用常规的信道估计,均衡和信道编码等算法。



图1 并行组合扩频Chirp水声通信系统框图
Fig.1 The diagram of PCSS Chirp underwater acoustic communication system

3. 系统仿真验证

为了验证系统的可靠性和有效性,分别对其进行了计算机仿真和实验室水池实验。通信数据帧格式如图2所示,发送数据由同步码、间隔和信息码组成。同步码采用脉宽为1s,带宽为2kHz~6kHz的Chirp信号,其频带覆盖实验用发射换能器的工作带宽。在同步码与信息码之间留有一定的时隙间隔,一般取大于信道的最大多径时延来避免同步码对信息码带来干扰。在计算机仿真中,水声多径信道被建模为一个多径的频率选择性衰落信道,多径信号能量服从负指数分布,多径时延服从均匀分布。信道传输函数为:

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{P_l} \delta(t - \tau_l) \quad (8)$$

其中, L 为多径的总径数, P_l 为第 l 径的幅度, τ_l 为第 l 径的时延,其中 P 满足:

$$P_l = \exp(-\tau_l / \tau_{mean}) \quad (9)$$

其中, τ_{mean} 为所有多径时延的均值。

在本次仿真中,结合实际应用选择了两种三径信道以及一种四径信道对系统性能进行了验证,其主径为第一径时延为0ms,多径时延为其余多径相对于主径的时延,两种三径信道的多径参数是 $\tau_1=4ms$, $\tau_2=10ms$ 和 $\tau_1=15ms$, $\tau_2=30ms$,四径信道的参数为 $\tau_1=4ms$, $\tau_2=10ms$ 和 $\tau_3=15ms$ 。Chirp信号参数如表1所示,仿真结果如图3所示,可以看出,在小时延多径环境下,当信噪比为-6dB时,系统误码率为 10^{-3} 量级。随着时延的增大和多径数量的增加,系统性能略有下降。在4径模型下,当信噪比大于4dB时,系统误码率小于 10^{-5} 。在多径信道模型下,系统的误码性能表现优异。



图2 并行组合扩频Chirp系统的数据帧格式

Fig.2 The data frame of PCSS Chirp system

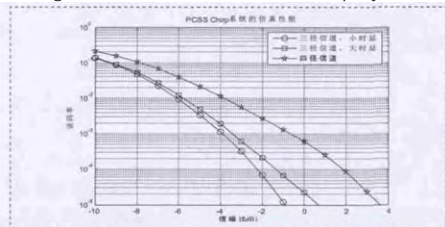


图3 并行组合扩频Chirp通信系统
在多径衰落信道下的误码性能

Fig.3 BER performance of PCSS Chirp

communication system over multipath channels

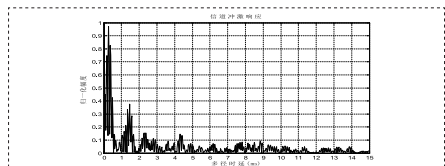


图4 水池信道的冲激响应

Fig.4 The channel impulse response of the pool

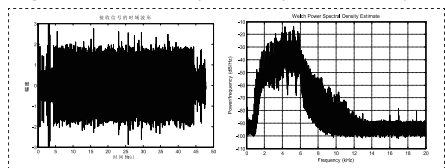


图5 水池实验接收信号的时域波形和功率谱密度
Fig.5 The time domain waveform and frequency spectrum of the received signal in pool

4. 水池实验验证

为验证并行组合扩频Chirp通信系统在水声信道中的性能,我们进行了水池实验。实验结果中的接收估计信噪比是用Welch法估算所得。厦门大学水声部重点实验室的水池尺寸为4.6m×3.0m×2.5m。由于水池四壁与池底都铺有瓷砖,因此声信号在其中传输时,受到池壁和池底的多次反射,存在较为严重的多径传输。图4为水池信道的冲激响应。可以看出,多径时延较大,如果将多径信号的归一化幅度小于最大幅度的10%的信号视为噪声和干扰信号,则水池中的最大多径时延大约为9ms。与多径能量随时延呈负指数分布的仿真信道相比,水池的多径信号的能量衰减更

表1 并行组合扩频Chirp系统的参数

Tab.1 The parameters of PCSS Chirp system

	中心频率(kHz)	采样率(kHz)	调频率(kHz/s)	持续时间(ms)	单个Chirp信号带宽(kHz)	有效信息速率(bps)
并行组合扩频Chirp系统	2.3/2.8/3.3/3.8/4.3/4.8/5.3/5.8	40	20	20	0.4	500

快,多径到达时间也更为随机。从图4可以看出,第一径信号同时也是能量最大的一径信号。

图5为水池实验接收信号的时域波形和功率谱密度,此时信号的接收信噪比为9.03dB,误码率为 9×10^{-4} ,证明了该系统在水池环境下进行信息传输的可靠性。多组不同接收信噪比的水池实验结果如表2所示,随着接收信噪比的下降,系统的可靠性有所降低,但误码性能维持在 10^{-3} 量级,证明了系统的稳定性。

表3 水池实验结果

Tab.3 Pool experiment results

并行组合扩频Chirp系统接收信噪比(dB)	比特误码率
第一组	12.02
第二组	9.03
第三组	5.97
第四组	3.81
第五组	-3.19

5. 总结与展望

本文给出了一种对可用带宽进行分割组合的并行组合扩频Chirp的水声通信系统,该系统的接收端采用分数阶Fourier变换的方法进行信号检测,大大简化了接收端的结构。相对于同等信号参数和分量参数的Chirp直扩系统来说通信速率可提升2.5倍,通过计算机仿真和水池实验验证了该系统水声环境下的通信性能。在接收信噪比为5.97dB的水池环境下系统的比特误码率为 2.1×10^{-3} 。Chirp信号本身所具有的抗干扰特性,结合并行组合扩频提升了系统的传输速率,使得系统能够以最简单的结构实现高速、有效和可靠的通信。但是由于本文所提出的Chirp通信系统,本质上还是一种多载波通信系统,因此不可避免地存在多载波系统中每个子载波上可分配的发送功率有限的缺点,且同样存在着峰值平均功率比较高的问题。因此在保证通信速率的条件下要实现远程水声通信,需要在系统中增加接收分集技术以及时频域的均衡技术。这将是我们未来的研究方向。

参考文献

- [1] Catipovic J A. Performance limitations in underwater acoustic telemetry[J]. Oceanic Engineering, IEEE Journal of, 1990, 15(3): 205-216.
- [2] Chitre M, Shahabudeen S, Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges[J]. Marine technology society journal, 2008, 42(1): 103-116.
- [3] Brekhovskikh L M, Lysanov I U P. Fundamentals of ocean acoustics[M]. Springer, 2003.
- [4] 陈冰冰, 胡晓毅, 陈华宾, 等. 基于被动时反镜技术的FRFT-CSS水声通信系统实验研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2012, 5: 008.
- [5] 陶然, 张峰, 王越. 分数阶Fourier变换离散化的研究进展[J]. 中国科学: E辑, 2008, 38(4): 481-503.
- [6] 殷敬伟, 王蕾, 张晓. 并行组合扩频技术在水声通信中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 958-962.
- [7] 陶然, 邓兵, 王越. 分数阶傅里叶变换及其应用[M]. 清华大学出版社, 2009.

基金项目: 福建省自然科学基金(项目编号: 2013J01253); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(项目编号: 2010121062); 国家自然科学基金(项目编号: 61301098)资助。